Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics,34, 2022. (67-78)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir



Numerical Study of the Effects of Geometry and Metal Foam on the Energy Absorption of Nested Profiles*

Research Article

Hemad Keshavarzpour[1], Ali Ghasemi[2], Mehdi Oveisi[3]

DOI: 10.22067/jacsm.2022.76176.1110

1. Introduction

Aluminum tubes filled with aluminum foam have a special role in the industry in the field of energy absorption. Their applications can be mentioned in the military, marine, aviation, elevators, and automotive industries. Different structures for profiles and their combination with other absorbers have been considered to increase energy absorption. In order to increase the energy absorption of the profiles, various parameters have been investigated such as: 1) geometry, including considering profiles with different shapes such as square, circle, pentagon, etc., the effect of thickness, creating distortion in the geometry, nested samples (inside hollow tubes, hollow tube is placed smaller): 2) adding absorbers such as aluminum foams; 3) strengthening (thermal treatment, etc.). Researchers have done many practical kinds of research on the energy absorption of thin-walled structures, which include testing, theorizing, numerical simulation, and optimization.

In this study, nested thin wall profiles are considered. Considering the effect of the profile shape on the energy absorption rate, the energy absorption rate of nested profiles was investigated at first. Considering the increase in energy absorption with the addition of absorbers in thin wall profiles, in the next step, the effect of adding aluminum foam to nested thin wall profiles was discussed. It is worth mentioning that the effect of geometry in nested profiles and the effect of adding different percentages of aluminum foam on the amount of energy absorption of nested thin wall profiles are among the innovations of this article.

2. Energy absorption

In order to calculate the impact performance of the structure, some indicators, such as total energy absorption (EA) were defined. Structures with different masses have entirely different energy absorption, so it is necessary to define an index to measure energy absorption for the unit of mass, SEA.

3. Modeling and simulation

3.1. Effect of geometry in thin wall profiles

Abaqus finite element software/explicit method was used for numerical analysis of impact dynamics. In order to investigate the effect of geometry on the amount of energy absorption of thin wall profiles, different geometric models with equal cross-sectional areas were considered. In the Abaqus model, to apply the impact of the profile, a thin wall is placed between two plates, a fixed plate is placed under the profile, and a moving plate is placed at the top of the profile. These two pages are modeled using the shell element. Figure 1 shows the investigated geometries.

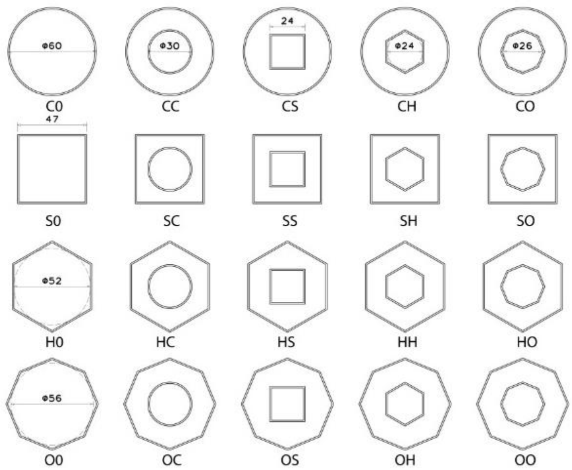


Figure 1. The cross-sectional area of geometry and dimensions of samples (in mm)

*Manuscript received: 11 April 2022; Revised, 28 June 2022, Accepted, 31 August 2022.

[1]. Corresponding Author: Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. **Email**: hkeshavarzpour@iaurasht.ac.ir

[2]. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

[3]. MSc., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

In the simulation, aluminum alloy profiles with a height of 150 mm and a thickness of 1 mm are considered. In order to apply the shock load, the upper plate with a speed of 1 m/s was applied to the thin wall profile for a period of 0.08 seconds. The type of element considered for the mesh is S4R with five integration points.

The results confirm that nested geometric models have more energy absorption than simple profiles. Among the considered simple profiles, the square profile with the specific energy absorption rate of 10763 J/kg was the worst and the circular profile with the specific energy absorption rate of 14814 J/kg had the best performance in terms of energy absorption. Moreover, the combination of the octagonal profile inside the aluminum tube (CO) had the best performance in terms of energy absorption. The amount of specific energy absorption in the CO state is 13.5%, and compared to a cylindrical tube (the commonly used profile) performed better regarding the amount of energy absorption.

Due to the best performance, the octagonal profile inside the aluminum tube was selected as a suitable example in terms of energy absorption, and then the effects of adding foam on its energy absorption was discussed.

3.2. The effect of aluminum foam percentage in nested thin wall profiles

In this section, the effects of adding different percentages of metal foam to selected CO thin wall profiles were investigated numerically. In order to check the accuracy of the modelling, a thin-walled aluminum tube made of 6060-T5 alloy with a diameter of 60 mm and a height of 150 mm filled with aluminum foam was simulated. The simulated force-displacement diagram is compared with the experimental results in Figure 2.

Now, according to the accuracy of the simulation results, the effects of adding foam to the profile of the selected nested thin wall (CO) were investigated. The foam is placed inside the tube in three different ways (only in the inner profile, in the space between the two profiles, and in the entire profile), and its effects on the energy absorption of the CO profile were investigated. Figure 3 shows the force-displacement results of the samples.

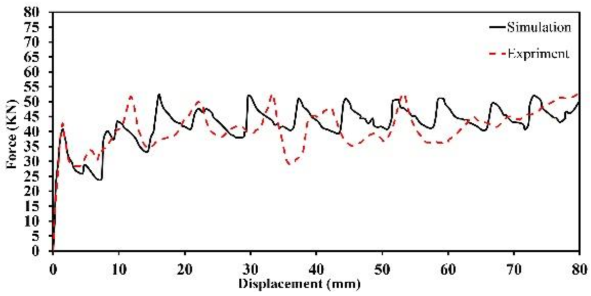


Figure 2. Comparison of the force-displacement results of the simulated and experimental sample

By adding more foam, the amount of energy absorption and the maximum force that can be tolerated increases. In terms of the amount of specific energy absorption, in the case where only the internal profile is filled with aluminum foam (COF-1), it performed better. It should also be mentioned that in the case where the aluminum foam is placed only in the space between the two walls (COF-2) compared to the case where the entire profile is filled with foam (COF-3), only about a 9% improvement in energy absorption was achieved. Moreover, adding foam can increase the amount of energy absorption with a change in weight. In other words, COF-1 and COF-3 increased energy absorption by 19% and 92%, respectively. Figure 4 shows the change in total energy of absorption (EA) of CO profile and COF-1 to COF-3 in the form of a column chart.

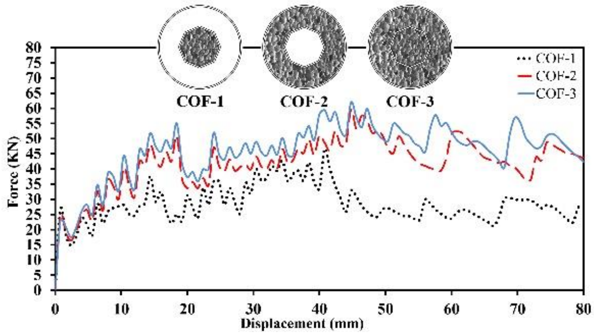


Figure 3. Force-displacement diagram for different states of adding foam to the nested profile for the CO geometry cross-section

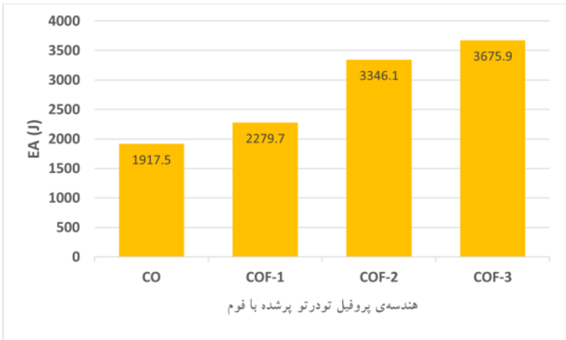


Figure 4. The effect of adding foam on the total absorption energy

4. Conclusion

After examining the profiles resulting from the combination of circular, square, hexagonal and octagonal profiles, the combination of the octagonal aluminum profile inside the aluminum tube has the best performance in terms of energy absorption. In the following, the effect of adding different modes of aluminum foam in the selected geometry was investigated. By placing the foam inside these profiles, on the one hand, it stabilizes the position of the nested samples relative to each other, and on the other hand, by filling the empty space between the profiles with foam, it increases the absorption of energy from the impact. In the case that only the inner profile is filled with aluminum foam, it performed better in terms of specific energy absorption.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

بررسی عددی اثر هندسه و فوم فلزی در میزان جذب انرژی پروفیل‌های تودرتو*

مقاله پژوهشی

حماد کشاورزپور[۱]   علی قاسمی[۲]   مهدی اویسی[۳]

DOI: 10.22067/jacsm.2022.76176.1110

چکیده *در این مقاله به بررسی اثر هندسه و اضافه‌شدن جاذب‌های فوم آلومینیوم در میزان جذب انرژی پروفیل‌های جدار نازک تودرتو تحت بار محوری فشاری پرداخته شده است. به منظور بررسی عددی، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. پروفیل‌های تودرتو از جنس آلومینیوم 6060-T5 و با سطوح مقطع دایره، مربع، شش‌ضلعی و هشت‌ضلعی انتخاب شده‌اند. نمودار نیرو و جابجایی به منظور بررسی میزان جذب انرژی هندسه‌های مختلف به همراه محاسبه‌ی جذب انرژی کلی و ویژه استفاده شده‌اند. در انتها، برای بررسی اثر فوم آلومینیوم، سه حالت اضافه‌شدن فوم به پروفیل تودرتو بررسی شده است. پروفیل‌های جدار نازک تودرتو با فوم فلزی نسبت به حالت توخالی جذب انرژی بیشتری دارند. همچنین، تعامل بین دیواره‌های فوم و لوله باعث افزایش بیشتر اتلاف انرژی می‌شود.*

واژه‌های کلیدی پروفیل‌های جدار نازک، پروفیل‌های تودرتو، هندسه، فوم آلومینیومی

Numerical Study of the Effect of Geometry and Metal Foam on the Energy Absorption of Nested Profiles

Hemad Keshavarzpour   Ali Ghasemi   Mehdi Oveisi

Abstract In this paper, the effect of geometry and addition of aluminum foam adsorbents on the energy absorption of thin-walled nested profiles under axial compressive load is investigated. ABAQUS finite element software has been used for numerical analysis. The nested profiles are made of 6060-T5 aluminum and the outer and inner profiles with circular, square, hexagonal and octagonal cross sections are selected. Force and displacement diagrams have been used to study the energy absorption of different geometries along with the calculation of general and specific energy absorption. Finally, to evaluate the effect of foam, three modes of adding aluminum foam to the nested profile have been investigated. Thin-walled profiles with metal foam absorb more energy than hollow ones. Also, the interaction between the foam walls and the pipe increases the energy dissipation further.

Keywords Thin-walled profiles, Nested profiles, Geometry, Aluminum foam

---

*تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱/۲۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۶/۹ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت، رشت.

Email: hkeshavarzpour@iaurasht.ac.ir

(۲) استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران

(۳) کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران

مقدمه

لوله‌های آلومینیومی پرشده با فوم آلومینیوم در زمینه‌ی جذب انرژی، بخش ویژه‌ای در صنعت را به خود اختصاص داده‌اند. از کاربردهای آنها می‌توان در صنایع نظامی، دریایی، هوایی، آسانسورها و همچنین صنعت خودروسازی نام برد [1]. ساختارهای مختلفی برای پروفیل‌ها و ترکیب آن‌ها با جاذب‌های دیگر برای افزایش جذب انرژی در نظر گرفته شده است. جهت افزایش میزان جذب انرژی پروفیل‌ها، پارامترهای مختلفی همچون ۱- هندسه شامل در نظر گرفتن پروفیل‌هایی با اشکال مختلف همانند مربع، دایره، پنج‌ضلعی و ...، اثر ضخامت، ایجاد اعوجاج در هندسه، نمونه‌های تودرتو (در داخل لوله‌های توخالی، لوله‌ی توخالی کوچک‌تری قرار داده شود)، ۲- اضافه کردن جاذب‌هایی مانند فوم‌های آلومینیومی، ۳- مقاوم‌سازی (عملیات حرارتی و ...) بررسی شده است.

محققین پژوهش‌های مؤثر زیادی را روی جذب انرژی ساختارهای جداره نازک انجام داده‌اند که شامل تست، تئوری، شبیه‌سازی عددی و بهینه‌سازی بوده است. به‌منظور افزایش توانایی جذب انرژی در این ساختارها، فوم یا لانه‌زنبوری درون ساختار قرار داده شده است و بین ماده پرکننده و جداره‌ی لوله تأثیرات برهمکنش قابل توجهی مشاهده شده است [3-2]. هانسن و همکاران [5-4] مطالعات جامعی روی ستون‌های جدار نازک پرشده با فوم انجام داده و زیرساخت مناسبی برای مطالعات تحلیلی و تجربی بر روی لوله‌های پرشده با فوم ایجاد کرده‌اند. در سال‌های اخیر لوله‌های جدار نازک پرشده با مواد مختلفی نظیر لوله‌ها با پروفیل دایروی [6]، لوله‌ها با پروفیل مربعی [7]، لوله‌های تودرتو [8]، لوله‌های چندوجهی [9]، لوله‌های مخروطی [10]، لوله‌های چروک [11]، لوله‌ها با پروفیل بیضوی [12] به‌صورت گسترده‌ای انجام شده است. گان و همکاران [13] خصوصیات جذب انرژی ساختارهای مخروطی تحت بار ضربه محوری را بررسی کردند. نتیجه مطالعات آن‌ها نشان داد که جذب انرژی ویژه حدود ۲۲/۹ درصد بیشتر از جذب انرژی ویژه‌ی لوله‌ی خالی است که به دلیل تأثیر تماس بین ساختارهای مخروطی می‌باشد. وینایاگار و همکاران [14] مطالعه‌ای روی عملکرد ضربه‌پذیری ساختارهای جدار نازک دو لوله‌ای انجام دادند که شامل لوله‌های داخلی و خارجی با پروفیل‌های مختلف نظیر مثلث، مربع و شش وجهی بوده است. مگوید و همکاران [15] به بررسی عددی و تجربی میزان جذب انرژی مخروط‌های آلومینیومی توخالی و پرشده از فوم آلومینیوم پرداختند. تأثیر پارامترهایی نظیر زاویه مخروط و تأثیر فوم و ... مطالعه شد. بیگدلی و نوری [16] به بررسی تجربی و عددی مدل‌های تودرتو آلومینیومی و تأثیر ابعاد نمونه‌ی داخلی پرداختند. در این مقاله، پروفیل مربعی به دو حالت داخل لوله آلومینیومی قرار گرفت. در حالت اول، پروفیل مربعی با اتصالاتی از گوشه‌ها به لوله وصل شده است و در حالت دوم اتصال پروفیل از دیواره‌ها با لوله انجام شده و درنهایت ابعاد مختلف پروفیل بررسی شده است. لی و همکاران به بررسی عددی و تجربی پروفیل‌های تودرتو آلومینیومی پرشده از فوم و بررسی درصد اضافه‌شدن فوم آلومینیوم پرداختند. نمونه‌های تودرتو شامل پروفیل‌های مربعی آلومینیومی داخل یکدیگر و نیز لوله‌های آلومینیومی داخل هم بودند [17].

از این‌رو، در این مقاله پروفیل‌های جدار نازک تودرتو در نظر گرفته شده است. با توجه به تأثیر شکل پروفیل در میزان جذب انرژی، در ابتدا به بررسی اثر هندسه در میزان جذب انرژی پروفیل‌های تودرتو پرداخته شده است. با توجه به افزایش میزان جذب انرژی با اضافه شدن جاذب‌ها در پروفیل‌های جدار نازک، در گام بعدی به اثر اضافه شدن فوم آلومینیومی به پروفیل‌های جدار نازک تودرتو پرداخته شده است. قابل‌ذکر است که اثر هندسه در پروفیل‌های تودرتو و اثر اضافه شدن درصدهای مختلف فوم آلومینیومی در میزان جذب انرژی پروفیل‌های جدار نازک تودرتو از نوآوری‌های این مقاله می‌باشد.

روش بررسی میزان جذب انرژی

به‌منظور محاسبه‌ی عملکرد ضربه‌پذیری سازه، برخی از شاخص‌ها نظیر جذب انرژی کلی تعریف شدند. جذب انرژی کلی به‌صورت رابطه‌ی (۱) می‌باشد:

$$EA = \int_0^d F(x)\mathrm{d}x \qquad (۱)$$

که F(x) بیانگر نیروی لحظه‌ای ضربه به ساختار در طول ضربه و d مسافت ضربه است.

ساختارها با جرم‌های مختلف، جذب انرژی کاملاً متفاوتی دارند از این‌رو لازم است که شاخصی برای اندازه‌گیری جذب

انرژی برای واحد جرم تعریف شود. جذب انرژی ویژه به‌صورت رابطه‌ی (۲) بیان می‌شود:

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (۲)$$

در این رابطه، m جرم کلی ساختار است. جذب انرژی ویژه بیشتر، به مفهوم عملکرد ضربه‌پذیری بهتر است.

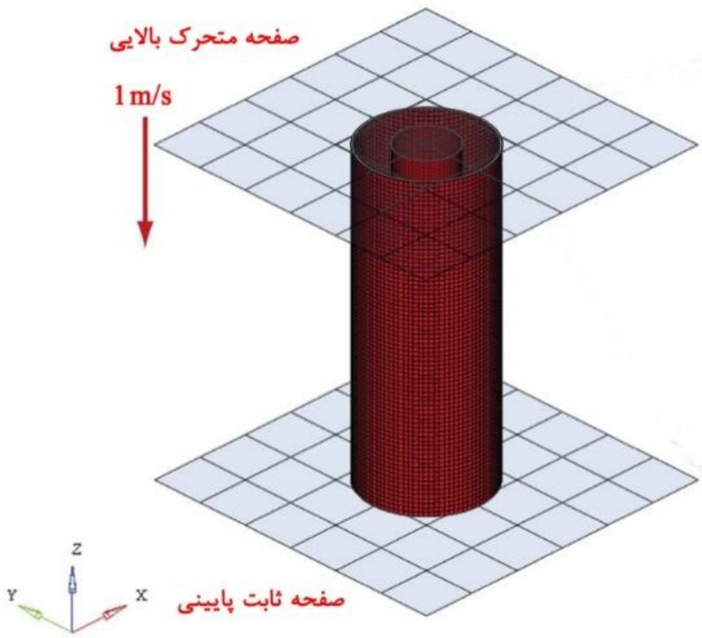
$F_{\max}$ بیشینه نیروی واکنش سازه در طول ضربه می‌باشد. برای فشار محوری بیشینه نیروی ضربه معمولاً در ابتدای برخورد اتفاق می‌افتد که به قله‌ی نیروی اولیه معروف است.

مدل‌سازی و شبیه‌سازی

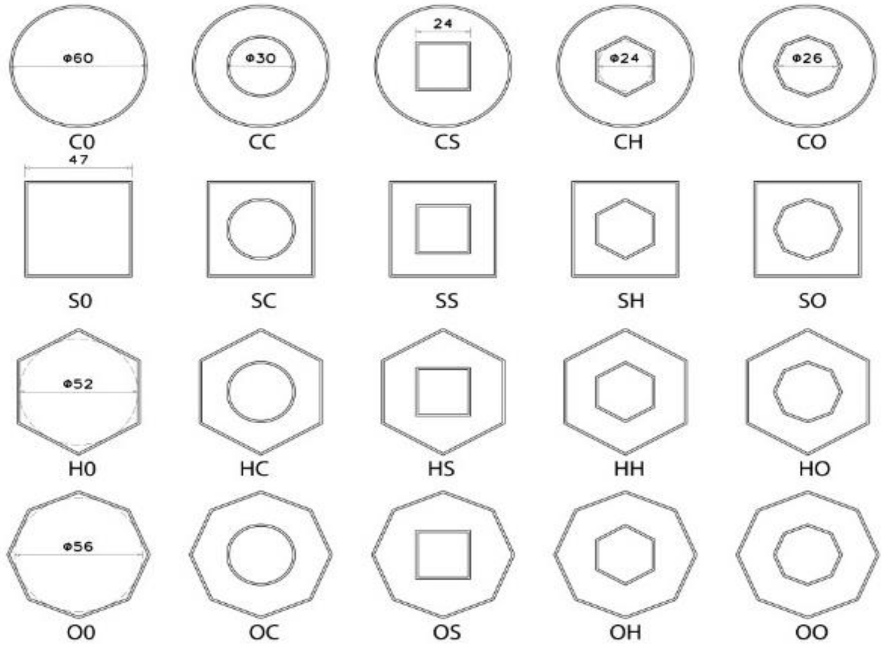
اثر هندسه در پروفیل‌های جدار نازک. برای بررسی عددی دینامیک ضربه از نرم‌افزار المان محدود آباکوس/روش صریح استفاده شده است. به‌منظور بررسی اثر هندسه در میزان جذب انرژی پروفیل‌های جدار نازک، مدل‌های هندسی متفاوت با سطوح مقطع برابر در نظر گرفته شده است. در مدل آباکوس، برای اعمال ضربه پروفیل جدار نازک مابین دو صفحه قرار می‌گیرد که یک صفحه ثابت در زیر پروفیل و یک صفحه متحرک در قسمت بالای پروفیل قرار داده شده است (شکل ۱). این دو صفحه با استفاده از المان پوسته مدل سازی شده‌اند. هندسه‌های مورد بررسی شده در شکل (۲) نشان داده شده است.

در شبیه‌سازی پروفیل‌ها از جنس آلیاژ آلومینیوم، با ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. خواص مکانیکی آلومینیوم و فوم آلومینیوم در جدول (۱) بیان شده است.

به‌منظور اعمال بار ضربه‌ای، صفحه‌ی بالائی با سرعت 1m/s در مدت زمان ۰/۰۸ ثانیه بر پروفیل جدار نازک اعمال شده است. نوع المان در نظر گرفته شده برای مش، S4R با پنج نقطه‌ی انتگرال‌گیری می‌باشد. نمودار نیرو–جابجایی هر یک از هندسه‌های در نظر گرفته شده (شکل ۲)، در شکل‌های (۳ – ۷) نشان داده شده است.



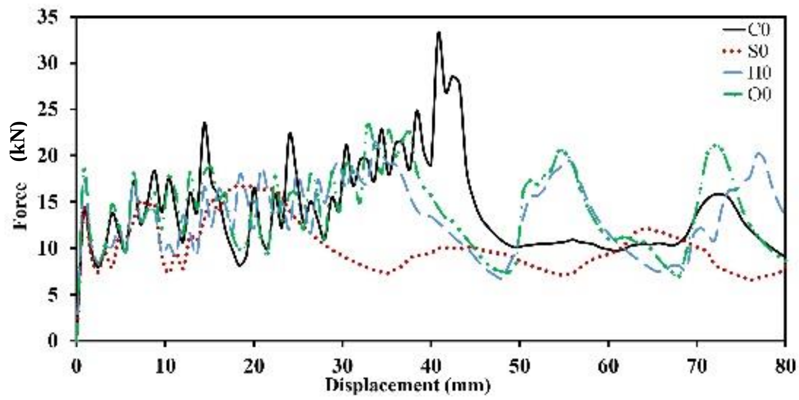
شکل ۱ نمایی از مدل اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس



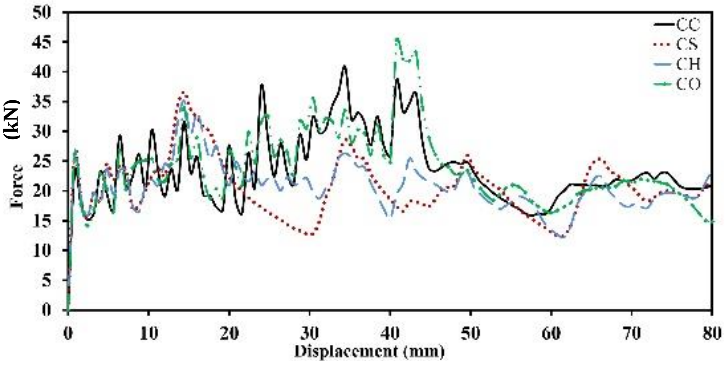
شکل ۲ سطح مقطع هندسه و ابعاد نمونه‌ها (ابعاد به میلی‌متر)

جدول ۱ خواص مکانیکی پروفیل‌های 6060 و فوم آلومینیوم

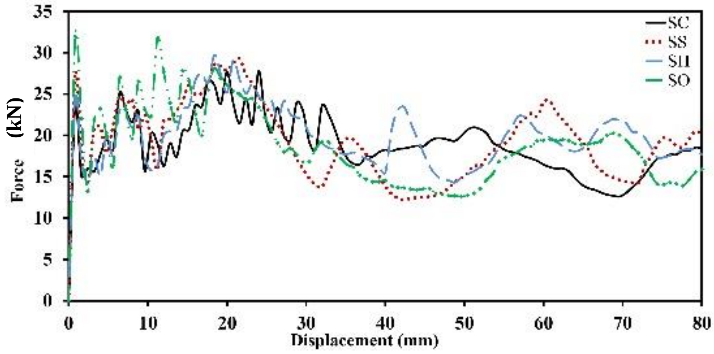
خواص مکانیکی	علامت اختصاری	آلومینیوم	فوم
مدول یانگ (MPa)	E	۵۰۸۶۰	٦۵
تنش تسلیم (MPa)	σ_y	۱۸۸/٤	٦/۹۵
ضریب پواسون	ϑ	۰/۳٦٦	۰/۰۵
چگالی (g/cm^3)	ρ	۲/۷	۰/٤۵



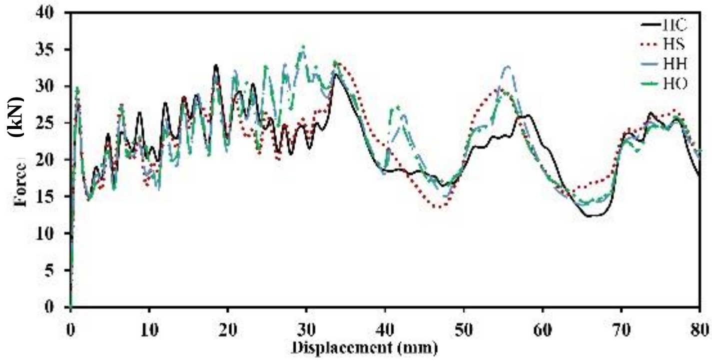
شکل ۳ نمودار نیرو–جابجایی مدل‌های CO، SO، HO، OO.



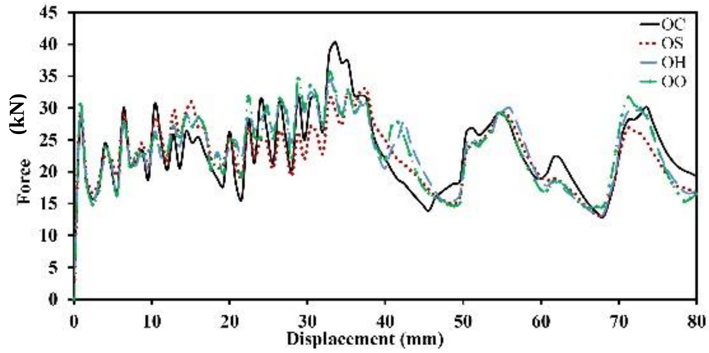
شکل ٤ نمودار نیرو-جابجایی مدل‌های CC، CS، CH، CO.



شکل ٥ نمودار نیرو-جابجایی مدل‌های SC، SS، SH، SO.



شکل ٦ نمودار نیرو-جابجایی مدل‌های HC، HS، HH، HO.



شکل ۷ نمودار نیرو-جابجایی مدل‌های OC، OS، OH، OO

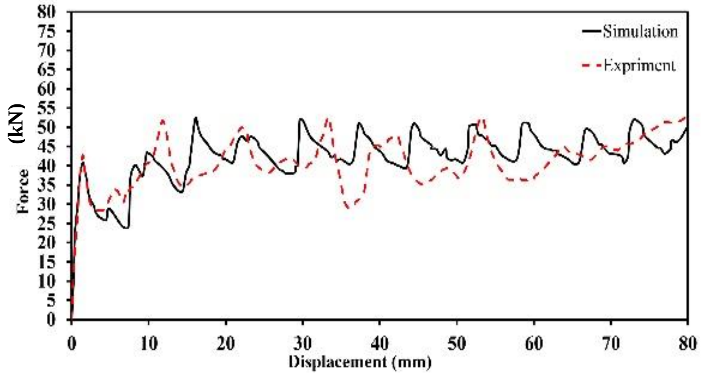
به‌منظور بررسی بهتر اثر هندسه بر روی میزان جذب انرژی پروفیل‌های جدار نازک تودرتو، شاخص‌های جذب انرژی در جدول (۲) آورده شده است.

نتایج جدول (۲) مؤید این موضوع می‌باشد که مدل‌های هندسی تودرتو میزان جذب انرژی بیشتری نسبت به پروفیل‌های ساده دارند. در بین پروفیل‌های ساده در نظر گرفته شده، پروفیل مربعی با میزان جذب انرژی ویژه ۱۰۷٦۳ ژول بر کیلوگرم بدترین و پروفیل دایره‌ای با میزان جذب انرژی ویژه ١٤٨١٤ ژول بر کیلوگرم بهترین عملکرد را در میزان جذب انرژی داشتند. همچنین ترکیب پروفیل هشت‌ضلعی در داخل لوله آلومینیوم (CO) بهترین عملکرد را در میزان جذب انرژی داشته است. میزان جذب انرژی ویژه در حالت CO ۱۳/۵ ٪ نسبت به یک لوله استوانه‌ای (پروفیل رایج مورد استفاده) عملکرد بهتری در میزان جذب انرژی داشته است. با توجه به بهترین عملکرد، پروفیل هشت‌ضلعی در داخل لوله آلومینیوم در میزان جذب انرژی به‌عنوان نمونه‌ی مناسب انتخاب و در ادامه به اثرات اضافه شدن فوم بر روی میزان جذب انرژی آن پرداخته شده است.

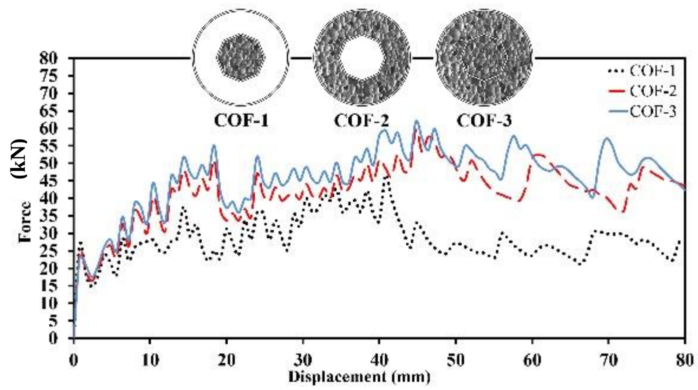
جدول ۲ اثر هندسه بر میزان شاخص‌های جذب انرژی پروفیل‌های جدار نازک تودرتو

نمونه	m (kg)	EA (J)	SEA (J/kg)	F_{max} (N)
C	۰/۰۷٦۳	۱۱۳۰/۳	١٤٨١٤	۳۳۱۷۷
CC	۰/۱۱۵	۱۸۸۸/٦	١٦٤٢٣	٤٠٨٥٢
CS	۰/۱۱۳	١٦٣٩/٦	١٤٥٠٩	٣٦٦١٨
CH	۰/۱۱	١٦٦٢	١٥١٠٩	٣٥١٢٣
CO	۰/۱۱٤	١٩١٧/٥	١٦٨٢٠	٤٥٣٥٢
S	۰/۰۷٦۱	٨١٩/٠٦	١٠٧٦٣	١٦٦٧٥
SC	۰/۱۱٤	١٥٠٥/٣	١٣٢٠٤	٢٧٧٧٥
SS	۰/۱۱۵	١٥٣٣	١٣٣٣١	٢٩٢٥٢
SH	۰/۱۱۳	١٥٩٥/٨	١٤١٢٢	٢٩٧٠٨
SO	۰/۱۱	١٤٩٧/١	١٣٦١٠	٣١٩٣٨
H	۰/۰۷۵۸	١٠٨٠/٩	١٤٢٥٩	٢١٣٨٠
HC	۰/۱۱۱	١٧٥٨/٦	١٥٨٤٣	٣٢٧٠٩
HS	۰/۱۱۵	١٧٩٨/٣	١٥٦٣٧	٣٢٨٨٧
HH	۰/۱۱۲	١٨٣٥	١٦٣٨٤	٣٤٦٠٣
HO	۰/۱۱۳	١٨٣٤/٦	١٦٢٣٥	٣٥٣٠٦
O	۰/۰۷۷۸	١١٣٠/٥	١٤٥٣١	٢٣١٨٩
OC	۰/۱۱٦	١٨٥٥/٧	١٥٩٩٨	٤٠٣٠٦
OS	۰/۱۱۳	١٨٠٨/٦	١٦٠٠٥	٣٢٩٠٩
OH	۰/۱۱٤	١٨٧٣/٦	١٦٤٣٥	٣٤٣٠٥
OO	۰/۱۱۵	١٨٦٩/٤	١٦٢٥٥	٣٥٥٣١

اثر درصد فوم آلومینیومی در پروفیل‌های جدار نازک تودرتو. در این بخش به بررسی عددی اثر اضافه شدن درصدهای مختلف فوم فلزی به پروفیل‌های جدار نازک انتخابی CO پرداخته شده است. به‌منظور بررسی صحت مدل‌سازی، لوله آلومینیومی جدار نازک از آلیاژ 6060-T5 با قطر ۶۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر پرشده با فوم آلومینیوم که نتایج تجربی آن در [1] موجود است، شبیه‌سازی شده و نمودار نیرو–جابجایی شبیه‌سازی صورت گرفته با نتایج تجربی در شکل (۸) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. حال با توجه به صحت نتایج شبیه‌سازی، به بررسی اثر اضافه‌شدن فوم در پروفیل جدار نازک تودرتو منتخب (CO) پرداخته شده است. فوم به سه حالت مختلف (تنها در پروفیل داخلی، در فضای بین دو پروفیل و در تمام پروفیل) داخل لوله قرارگرفته و تأثیر آن در میزان جذب انرژی پروفیل CO بررسی شده است. نتایج نیرو–جابجایی نمونه‌ها در شکل (۹) نشان داده شده است. همچنین به‌منظور بررسی بهتر اثر اضافه‌شدن درصدهای مختلف فوم آلومینیومی بر روی میزان جذب انرژی پروفیل‌های جدار نازک تودرتو CO، شاخص‌های جذب انرژی در جدول (۳) آورده شده است.



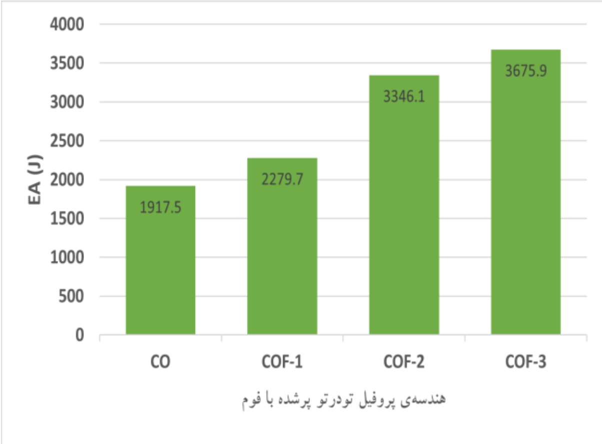
شکل ۸ مقایسه نتایج نیرو–جابجایی نمونه شبیه‌سازی شده و تجربی



شکل ۹ نمودار نیرو–جابجایی برای حالات مختلف اضافه شدن فوم به پروفیل تودرتو برای سطح مقطع هندسه CO

جدول ۳ اثر حالات مختلف اضافه شدن فوم بر میزان شاخص‌های جذب انرژی برای سطح مقطع هندسه CO

نمونه	m (kg)	EA (J)	SEA (J/kg)	F_{max} (N)
COF-1	۰/۱۵۱۸	۲۲۷۹/۷	۱۵۰۱۸	٤٦٥٧٣
COF-2	۰/۲٤۸	۳۳٤٦/۱	۱۳٤۹۲	٥۹٦۳۲
COF-3	۰/۲۸٦	۳٦۷٥/۹	۱۲۸٥۳	٦۱۹۹٦



شکل ۱۰ اثر اضافه‌شدن فوم بر انرژی کلی جذب

نتایج جدول (۳) مؤید این موضوع است که با اضافه شدن بیشتر فوم، میزان جذب انرژی و حداکثر نیروی قابل تحمل افزایش می‌یابد. از لحاظ میزان جذب انرژی ویژه در حالتی که تنها پروفیل داخلی از فوم آلومینیوم پر شده باشد (COF-1)، عملکرد بهتری داشته است. همچنین قابل ذکر است که در حالتی که فوم آلومینیوم تنها در فضای بین دوجداره قرار گیرد (COF-2) نسبت به حالتی که تمام پروفیل از فوم پر گردد (COF-3) تنها حدود ۹٪ در میزان جذب انرژی بهبود حاصل شده است. همچنین با مقایسه نتایج جدول (۲ و ۳) می‌توان به این موضوع پی برد که اضافه کردن فوم می‌تواند میزان جذب انرژی را با تغییر در وزن افزایش دهد. به عبارتی حالت COF-1 و COF-3 نسبت پروفیل تودرتو انتخابی (CO) به ترتیب حدود ۱۹٪ و ۹۲٪ افزایش جذب انرژی داشتند. شکل (۱۰) نحوه‌ی تغییر انرژی کلی جذب (EA) پروفیل CO و COF-1 تا COF-3 را به صورت نمودار ستونی نمایش می‌دهد.

نتیجه گیری

بعد از بررسی پروفیل‌های حاصل از ترکیب پروفیل‌های دایره، مربع، شش‌ضلعی و هشت‌ضلعی، ترکیب پروفیل آلومینیومی هشت‌ضلعی در داخل لوله‌ی آلومینیوم بهترین عملکرد را در میزان جذب انرژی دارا می‌باشد. در ادامه به بررسی اثر اضافه شدن حالت‌های مختلف فوم آلومینیومی در هندسه منتخب پرداخته شده است. با قرار گرفتن فوم داخل این پروفیل‌ها از یک‌سو باعث ثبات موقعیت قرارگیری نمونه‌های تودرتو نسبت به یکدیگر و از سوی دیگر با پر شدن فضای خالی بین پروفیل‌ها توسط فوم باعث افزایش جذب انرژی حاصل از ضربه شده است. در حالتی که تنها پروفیل داخلی از فوم آلومینیوم پرشده باشد، از لحاظ میزان جذب انرژی ویژه عملکرد بهتری داشته است.

تقدیر و تشکر

واژه نامه

فوم فلزی	Metal Foam
پروفیل تودرتو	Nested profile
جذب انرژی	Energy absorption

مراجع

1. Zhu, G., Sun, G., Li, G., Cheng, A. and Li, Q., “Modeling for CFRP structures subjected to quasi-static crushing”, *Composite Structures*, Vol. 184, Pp. 41-55, (2018).
2. Liu, Q., Fu, J., Wang, J., Ma, J., Chen, H., Li, Q. and Hui, D., “Axial and lateral crushing responses of aluminum honeycombs filled with EPP foam”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 130, Pp. 236-247, (2017).
3. Mozafari, H., Khatami, S., Molatefi, H., Crupi, V., Epasto, G. and Guglielmino, E., “Finite element analysis of foam-filled honeycomb structures under impact loading and crashworthiness design”, *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 21, No. 2, Pp. 148-160, (2016).
4. Hanssen, A. G., Langseth, M. and Hopperstad, O. S., “Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 5, Pp. 475-507, (2000).
5. Hanssen, A. G., Langseth, M. and Hopperstad, O. S., “Optimum design for energy absorption of square aluminium columns with aluminium foam filler”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, No. 1, Pp. 153-176,

(2001).

6. Djamaluddin, F., Abdullah, S., Ariffin, A. K. and Nopiah, Z. M., “Optimization of foam-filled double circular tubes under axial and oblique impact loading conditions”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 87, Pp. 1-11, (2015).
7. Zhang, Y., Sun, G., Li, G., Luo, Z. and Li, Q., “Optimization of foam-filled bitubal structures for crashworthiness criteria”, *Materials & Design*, Vol. 38, Pp. 99-109, (2012).
8. Zhang, Y., Ge, P., Lu, M. and Lai, X., “Crashworthiness study for multi-cell composite filling structures”, *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 23, No. 1, Pp. 32-46, (2018).
9. Hussein, R. D., Ruan, D., Lu, G., Guillow, S. and Yoon, J. W., “Crushing response of square aluminium tubes filled with polyurethane foam and aluminium honeycomb”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 110, Pp. 140-154, (2017).
10. Yin, H., Fang, H., Xiao, Y., Wen, G. and Qing, Q., “Multi-objective robust optimization of foam-filled tapered multi-cell thin-walled structures”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 52, No. 6, Pp. 1051-1067, (2015).
11. Mozafari, H., Lin, S., Tsui, G. C. and Gu, L., “Controllable energy absorption of double sided corrugated tubes under axial crushing”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 134, Pp. 9-17, (2018).
12. Gao, Q., Wang, L., Wang, Y. and Wang, C., “Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of foam-filled ellipse tubes under oblique impact loading”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 100, Pp. 105-112, (2016).
13. Gan, N., Yao, S., Dong, H., Xiong, Y., Liu, D. and Pu, D., “Energy absorption characteristics of multi-frusta configurations under axial impact loading”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 122, Pp. 147-157, (2018).
14. Vinayagar, K. and Kumar, A. S., “Crashworthiness analysis of double section bi-tubular thin-walled structures”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 112, Pp. 184-193, (2017).
15. Liu, Z., Huang, Z. and Qin, Q., “Experimental and theoretical investigations on lateral crushing of aluminum foam-filled circular tubes”, *Composite Structures*, Vol. 175, Pp. 19-27, (2017).
16. Bigdeli, A. and Nouri, M. D., “A crushing analysis and multi-objective optimization of thin-walled five-cell structures”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 137, Pp. 1-18, (2019).
17. Li, Z., Chen, R. and Lu, F. “Comparative analysis of crashworthiness of empty and foam-filled thin-walled tubes”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 124, Pp. 343-349, (2018).